

СИНТЕЗ СТРУКТУРИ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

¹Вінницький національний технічний університет

Значна частина електричних двигунів, в тому числі й асинхронних з короткозамкненим ротором, які працюють на виробництві, вже вичерпали свій ресурс, передбачений заводом-виробником. Однак більшість з них ще здатні виконувати своє службове призначення. Тому їх використання реалізовано не за терміном служби, а за технічним станом. Але для надійної роботи таких електричних двигунів потрібно точно знати їх залишковий ресурс. Це стосується й нових електричних двигунів, в процесі експлуатації яких можливі різні перевантаження, що здатні різко зменшити ресурс, що залишився.

Найдостовірнішими методами та засобами діагностування асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором є ті, що забезпечують постійний моніторинг технічного стану електродвигунів в процесі їх експлуатації. Тому вирішено визначити залишковий ресурс електричного двигуна в процесі його експлуатації.

Як діагностичні ознаки для визначення залишкового ресурсу асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором вибрано такі параметри: струми у кожній фазі електродвигуна, температуру найбільш нагрітої точки обмотки, швидкість зміни температури обмотки, температуру підшипникових вузлів, рівень вібрації.

Для синтезу структури пристрою у визначенні залишкового ресурсу електричного двигуна використано апарат секвенцій. Показаний процес синтезу для двох значень струму, двох значень температур обмотки, двох значень швидкості змін температур обмотки, двох значень температур підшипників та двох значень вібрацій.

Запропоновано математичну модель функціонування блока обчислення залишкового ресурсу асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у вигляді системи секвенцій. На основі отриманої секвенційної моделі синтезовано функціональну схему блока обчислення залишкового ресурсу електричного двигуна, що дало можливість розробити структуру пристрою для визначення його залишкового ресурсу. Отримана структура пристрою дозволяє контролювати параметри асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в процесі його роботи.

Ключові слова: електричний двигун, асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, залишковий ресурс, надійність роботи.

Вступ

На виробництві експлуатується достатньо велика кількість електричних двигунів, в тому числі й асинхронних з короткозамкненим ротором, які вже вичерпали свій ресурс, передбачений заводом-виробником, при чому значна їх частина ще здатна повною мірою виконувати покладені на них задачі. Використання таких електричних двигунів реалізовано не за терміном служби, а за їх технічним станом. Але при цьому виникає ризик виникнення аварійних ситуацій, оскільки надійність їх роботи суттєво знижена. А тому для підвищення надійності функціонування електричних двигунів потрібно точно знати їх залишковий ресурс. Це стосується й нових електричних двигунів, в процесі експлуатації яких можливі різні перевантаження, що здатні різко зменшити ресурс, що залишився. Тому тема досліджень є актуальною.

Визначення залишкового ресурсу асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором можливе як у разі тестового діагностування, так і у разі функціонального діагностування [1].

Проаналізувавши методи та засоби діагностування асинхронних двигунів, можна констатувати, що найдостовірнішими є ті, що забезпечують постійний моніторинг технічного стану електродвигунів в процесі їх експлуатації [2], [3]. При цьому відслідковуються зміни параметрів в електродвигуні на всіх його стадіях: під час пуску, роботи, гальмування. Крім того, є можливість врахування впливу зовнішніх факторів (наприклад, температури) після його вимкнення.

Реалізація такого підходу запропонована в роботі [4] у вигляді структурної схеми інформаційно-вимірювальної системи діагностування електродвигунів. Однак під час визначення залишкового ресурсу двигуна вона не враховує температуру підшипникових вузлів та рівень вібрації. Крім того контролюється струм, який споживається з мережі лише одним сенсором, що зменшує достовірність кінцевого результату.

Метою роботи є підвищення надійності роботи асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором шляхом удосконалення структури пристрою для визначення його залишкового ресурсу в процесі функціонування за рахунок збільшення кількості контрольованих параметрів, які впливають на зменшення цього ресурсу.

Результати дослідження

Проаналізувавши фактори, які найсуттєвіше впливають на зміну залишкового ресурсу електричного двигуна, як діагностичні ознаки обрано такі параметри: струми у кожній фазі електродвигуна; температуру найнагрітішої точки обмотки; швидкість зміни температури обмотки; температуру підшипникових вузлів; рівень вібрації.

Для синтезу структури пристрою для визначення залишкового ресурсу електричного двигуна пропонується використання апарату секвенцій [2], [4], [5].

Враховуючи складність структури пристрою для визначення залишкового ресурсу електродвигуна, що синтезується, як приклад покажемо процес синтезу для: двох значень струму I_1 та I_2 ($I_1 < I_2$); двох значень температур обмотки t_1^0 та t_2^0 ($t_1^0 > t_2^0$); двох значень швидкості змін температур обмоток ϑ_1 та ϑ_2 ($\vartheta_1 < \vartheta_2$); двох значень температур підшипників t_3^0 та t_4^0 ($t_3^0 > t_4^0$); двох значень вібрацій L_1 та L_2 ($L_1 < L_2$).

Позначимо $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8, T_9, T_{10}$ — тригери, які фіксують параметри $I_1, I_2, t_1^0, t_2^0, \vartheta_1, \vartheta_2, t_3^0, t_4^0, L_1$ та L_2 , відповідно. Виходячи з того, що за різних значень температури та струму в лічильник залишкового ресурсу двигуна повинні поступати різні кількості імпульсів, то для подачі цих імпульсів в лічильник введемо відповідні елементи часової затримки на перемикання: τ_1 і τ_2 у відповідності з T_1 ; τ_3 і τ_4 у відповідності з T_2 ; τ_5 і τ_6 у відповідності з T_3 ; τ_7 і τ_8 у відповідності з T_4 ; τ_9 і τ_{10} у відповідності з T_5 ; τ_{11} і τ_{12} у відповідності з T_6 ; τ_{13} і τ_{14} у відповідності з T_7 ; τ_{15} і τ_{16} у відповідності з T_8 ; τ_{17} і τ_{18} у відповідності з T_9 ; τ_{19} і τ_{20} у відповідності з T_{10} .

Елементи $\tau_1, \tau_3, \tau_5, \tau_7, \tau_9, \tau_{11}, \tau_{13}, \tau_{15}, \tau_{17}, \tau_{19}$ характеризують тривалість одного імпульсу, а $\tau_2, \tau_4, \tau_6, \tau_8, \tau_{10}, \tau_{12}, \tau_{14}, \tau_{16}, \tau_{18}, \tau_{20}$ — паузи між імпульсами.

Виходячи з цього, використовуючи $(T_1, \tau_1, \tau_2), (T_2, \tau_3, \tau_4), (T_3, \tau_5, \tau_6), (T_4, \tau_7, \tau_8), (T_5, \tau_9, \tau_{10}), (T_6, \tau_{11}, \tau_{12}), (T_7, \tau_{13}, \tau_{14}), (T_8, \tau_{15}, \tau_{16}), (T_9, \tau_{17}, \tau_{18}), (T_{10}, \tau_{19}, \tau_{20})$, можна змоделювати генератори імпульсів з різними частотами f_i ($i = 1, 2, \dots, 10$), причому $f_1 < f_2$; $f_3 > f_4$; $f_5 < f_6$; $f_7 > f_8$; $f_9 < f_{10}$.

Оскільки $f_1 = 1/(\tau_1 + \tau_2)$, $f_2 = 1/(\tau_3 + \tau_4)$, $f_3 = 1/(\tau_5 + \tau_6)$, $f_4 = 1/(\tau_7 + \tau_8)$, $f_5 = 1/(\tau_9 + \tau_{10})$, $f_6 = 1/(\tau_{11} + \tau_{12})$, $f_7 = 1/(\tau_{13} + \tau_{14})$, $f_8 = 1/(\tau_{15} + \tau_{16})$, $f_9 = 1/(\tau_{17} + \tau_{18})$ і $f_{10} = 1/(\tau_{19} + \tau_{20})$, то для нормального функціонування цих генераторів імпульсів достатньо вибрати елементи часової затримки з такими співвідношеннями за тривалістю сигналів: $\tau_1 = \tau_3 = \tau_5 = \tau_7 = \tau_9 = \tau_{11} = \tau_{13} = \tau_{15} = \tau_{17} = \tau_{19}$; $\tau_2 > \tau_4$; $\tau_6 < \tau_8$; $\tau_{10} > \tau_{12}$; $\tau_{14} > \tau_{16}$; $\tau_{18} < \tau_{20}$; $\tau_3 < \tau_4$, $\tau_5 < \tau_6$; $\tau_7 < \tau_8$; $\tau_9 < \tau_{10}$; $\tau_{11} < \tau_{12}$; $\tau_{13} < \tau_{14}$; $\tau_{15} < \tau_{16}$; $\tau_{17} < \tau_{18}$; $\tau_{19} < \tau_{20}$; $\tau_{20} < \tau_4 < \tau_6 < \tau_8 < \tau_{10}$.

Для запам'ятовування імпульсів введемо ще тригери $T_{11}, T_{12}, T_{13}, T_{14}$, за допомогою яких моделюється лічильник імпульсів врахування залишкового ресурсу двигуна. Для нормального функціонування такого лічильника імпульсів необхідно ввести три елементи часової затримки, які повинні стояти між сусідніми тригерами T_{11} і T_{12} , T_{12} і T_{13} і T_{13} і T_{14} .

В граф функціонування блока обчислення залишкового ресурсу системи діагностування додамо ще одну гілку, що описує сигнал F^* , який подається в структуру системи діагностування в момент подачі напруги живлення. Це потрібно для обнулення тригерів $T_{11} \dots T_{14}$ (в моделі лічильника) і підготовки їх до робочого циклу.

Логічна змінна виходу $y = 0$ відповідає тому, що ресурс ще в межах норми, або лічильник імпуль-

сів ще не обнулився. В протилежному випадку $y = 1$.

З урахуванням наведених викладок граф функціонування блока обчислення залишкового ресурсу електродвигуна має вигляд, показаний на рис. 1, на якому числами від 0 до 44 позначені стани (наприклад, цифри 0 відповідає стан S_0); y або \bar{y} — вихідна змінна. Для компактності позначимо $X_{i,j}$ — узагальнена вхідна змінна, з якою система переходить зі стану S_i в стан S_j .

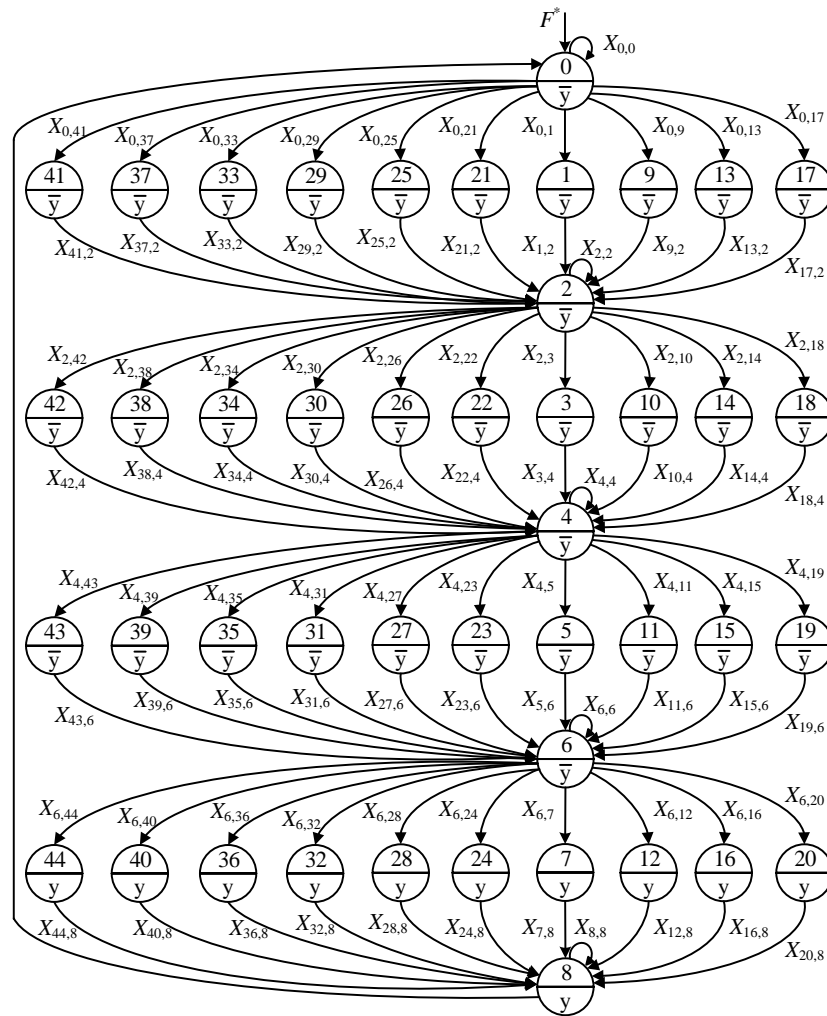


Рис. 1. Граф функціонування блока обчислення залишкового ресурсу системи діагностування електродвигуна

Аналітично функціонування блока обчислення залишкового ресурсу електричного двигуна можна описати системою секвенцій:

F^* — S_0 ;	$X_{4,11}\bar{S}_4$ — S_{11} ;	$X_{6,20}\bar{S}_6$ — S_{20} ;	$X_{0,29}S_0$ — S_{29} ;
$X_{0,0}S_0$ — S_0 ;	$X_{11,6}S_{11}$ — S_6 ;	$X_{20,8}S_{20}$ — S_8 ;	$X_{29,2}S_{29}$ — S_2 ;
$X_{0,1}S_0$ — S_1 ;	$X_{6,12}S_6$ — S_{12} ;	$X_{0,21}S_0$ — S_{21} ;	$X_{2,30}S_2$ — S_{30} ;
$X_{1,2}S_1$ — S_2 ;	$X_{12,8}S_{12}$ — S_8 ;	$X_{21,2}S_{11}$ — S_2 ;	$X_{30,4}S_3$ — S_4 ;
$X_{2,2}S_2$ — S_2 ;	$X_{0,13}S_0$ — S_{13} ;	$X_{2,22}S_2$ — S_{22} ;	$X_{3,4}S_3$ — S_4 ;
$X_{2,3}S_2$ — S_3 ;	$X_{13,2}S_{13}$ — S_2 ;	$X_{22,4}S_{22}$ — S_4 ;	$X_{4,31}S_4$ — S_{31} ;
$X_{3,4}S_3$ — S_4 ;	$X_{2,14}S_2$ — S_{14} ;	$X_{4,23}S_4$ — S_{23} ;	$X_{31,6}S_{31}$ — S_6 ;
$X_{4,4}S_4$ — S_4 ;	$X_{14,4}S_{14}$ — S_4 ;	$X_{23,6}S_{23}$ — S_6 ;	$X_{6,32}S_6$ — S_{32} ;
$X_{4,5}S_4$ — S_5 ;	$X_{4,15}S_4$ — S_{15} ;	$X_{6,24}S_6$ — S_{24} ;	$X_{32,8}S_{32}$ — S_8 ;
$X_{5,6}S_0$ — S_6 ;	$X_{15,6}S_{15}$ — S_6 ;	$X_{24,8}S_{24}$ — S_8 ;	$X_{34,4}S_3$ — S_4 ;
$X_{6,6}S_6$ — S_6 ;	$X_{6,16}S_6$ — S_{16} ;	$X_{0,25}S_0$ — S_{25} ;	$X_{34,4}S_3$ — S_4 ;
$X_{6,7}S_6$ — S_7 ;	$X_{16,8}S_{16}$ — S_8 ;	$X_{25,2}S_{25}$ — S_2 ;	$X_{4,35}S_4$ — S_{35} ;
$X_{7,8}S_7$ — S_8 ;	$X_{0,17}S_0$ — S_{17} ;	$X_{2,26}S_2$ — S_{26} ;	$X_{35,6}S_{35}$ — S_6 ;
$X_{8,8}S_8$ — S_8 ;	$X_{17,2}S_{17}$ — S_2 ;	$X_{26,4}S_{26}$ — S_4 ;	$X_{36,8}S_{36}$ — S_8 ;

$$\begin{aligned}
\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_8; & \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_9; \\
\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{10}; & \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{11}; \\
\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{12}; & \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{13}; \\
\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{14}; & \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{15}; \\
\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{16}; & \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{17}; \\
\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{18}; & \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{19}; \\
\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{20}; & \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{21}; \\
\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{22}; & \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{23}; \\
\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{24}; & \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{25}; \\
\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{26}; & \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{27}; \\
\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{28}; & \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{29}; \\
\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{30}; & \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{31}; \\
\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{32}; & \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{33}; \\
\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{34}; & \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{35}; \\
\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{36}; & \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{37}; \\
\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{38}; & \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{39}; \\
\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{40}; & \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{41}; \\
\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{42}; & \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{43}; \\
\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}} &\in S_{44}.
\end{aligned}$$

Підставивши вирази (2) і (3) в (1) та здійснивши перетворення й мінімізацію відповідно до [4], отримаємо такі секвенційні вирази:

$$\begin{aligned}
I_1 \tau_2 \overline{T_1} \mid T_1; & \quad \tau_1 T_1 \mid \overline{T_1}; & I_2 \tau_4 \overline{T_2} \mid T_2; & \quad \tau_3 T_2 \mid \overline{T_2}; & t_1^0 \tau_6 \overline{T_3} \mid T_3; & \quad \tau_5 T_3 \mid \overline{T_3}; \\
t_2^0 \tau_8 \overline{T_4} \mid T_4; & \quad \tau_7 T_4 \mid \overline{T_4}; & \vartheta_1 \tau_{10} \overline{T_5} \mid T_5; & \quad \tau_9 T_5 \mid \overline{T_5}; & \vartheta_2 \tau_{12} \overline{T_6} \mid T_6; & \quad \tau_{11} T_6 \mid \overline{T_6}; \\
L_1 \tau_{14} \overline{T_7} \mid T_7; & \quad \tau_{13} T_7 \mid \overline{T_7}; & L_2 \tau_{16} \overline{T_8} \mid T_8; & \quad \tau_{15} T_8 \mid \overline{T_8}; & t_3^0 \tau_{18} \overline{T_9} \mid T_9; & \quad \tau_{17} T_9 \mid \overline{T_9}; \\
t_4^0 \tau_{20} \overline{T_{10}} \mid T_{10}; & \quad \tau_{19} T_{10} \mid \overline{T_{10}}; & T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4 \vee T_5 \vee T_6 \vee T_7 \vee T_8 \vee T_9 \vee T_{10} \mid T_{11}; & & & \\
\tau_{20} (T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4 \vee T_5 \vee T_6 \vee T_7 \vee T_8 \vee T_9 \vee T_{10}) T_{11} \mid T_{12}; & & & & & \\
\tau_{20} (T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4 \vee T_5 \vee T_6 \vee T_7 \vee T_8 \vee T_9 \vee T_{10}) T_{12} \mid T_{13}; & & F^* \mid \overline{T_{11}} \overline{T_{12}} \overline{T_{13}} \overline{T_{14}}; & & & \\
\tau_{20} (T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4 \vee T_5 \vee T_6 \vee T_7 \vee T_8 \vee T_9 \vee T_{10}) T_{13} \mid T_{14}; & & T_{11} T_{12} T_{13} T_{14} \mid \neg. & & &
\end{aligned} \tag{4}$$

На основі отриманої секвенційної моделі (4) синтезовано функціональну схему блока обчислення залишкового ресурсу електродвигуна, що дало можливість розробити структуру пристрою для визначення його залишкового ресурсу (рис. 2).

Запропонований пристрій працює так. З подачею напруги живлення на пристрій блок установки нуля 8 коротким імпульсом переводить в початковий нульовий стан перший 6, другий 20, третій 37, четвертий 83 і п'ятий 64 розподільники тактів, а з подачею імпульсу на двійковий лічильник ресурсу 27, в останній записується значення робочого ресурсу двигуна з задавача ресурсу 25. Одночасно на виходах першого 10, другого 24 третього 38 і п'ятого 84 генераторів імпульсів починають вироблятися послідовності імпульсів.

Припускається, що в блоці задавача швидкості зміни температури 17 записане максимально допустиме значення швидкості зміни температури, в блоці задавача ресурсу 25 в цифровому вигляді — значення робочого ресурсу електричного двигуна, в задавачі максимального рівня вібрації 61 — максимально допустиме значення рівня вібрації, в задавачі температури 69 — максимально допустиме значення температури підшипникових вузлів, в задавачі максимального рівня температури 86 — максимально допустиме значення температури обмотки, що відповідає класу ізоляції.

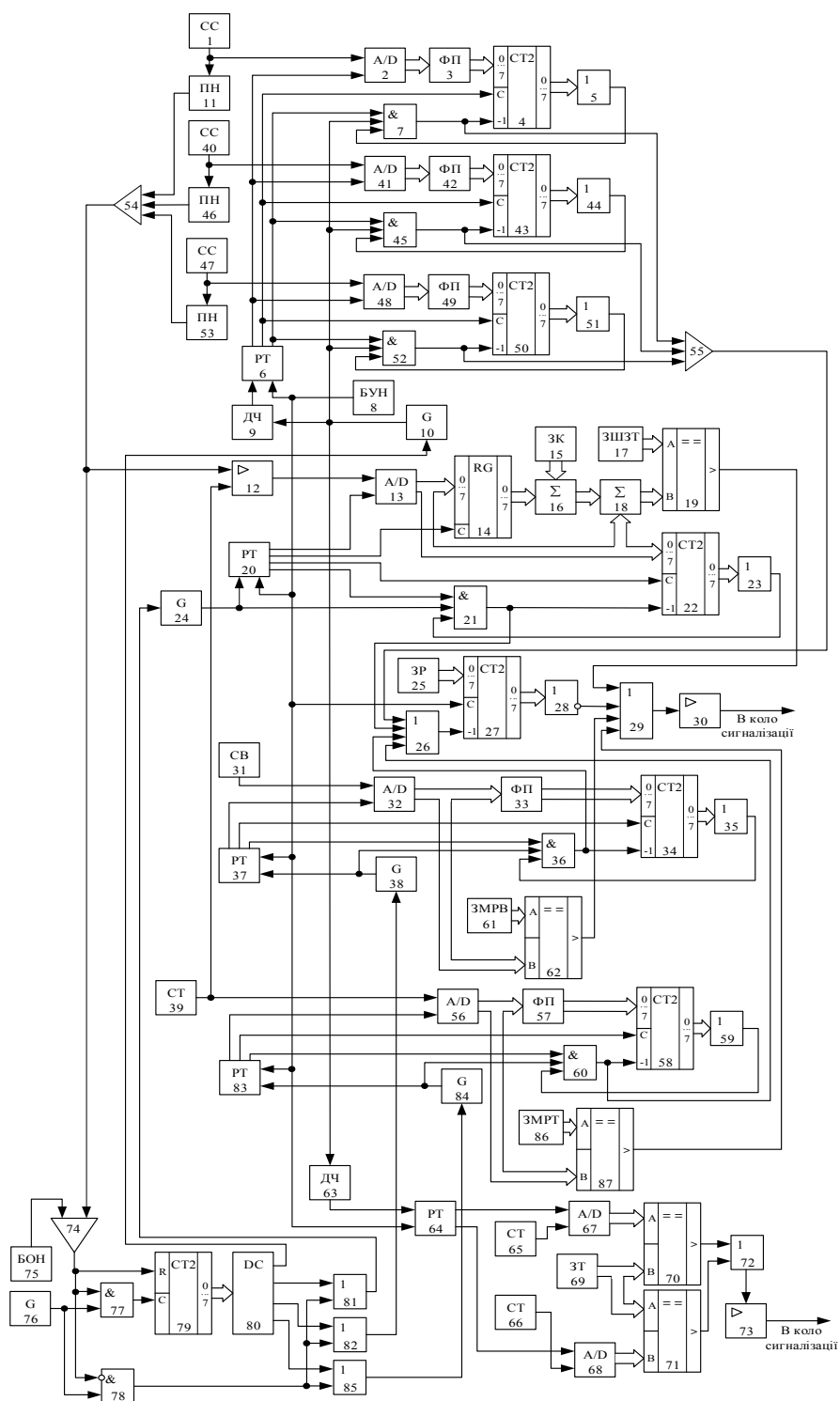


Рис. 2. Структура пристрою для визначення залишкового ресурсу електродвигуна: 1, 40, 47 — відповідно, перший, другий та третій сенсори струму; 2, 13, 32, 41, 48, 67, 68, 56 — відповідно, перший — восьмий аналого-цифрові перетворювачі; 3, 33, 42, 49, 57 — відповідно, перший — п'ятий функціональні перетворювачі; 4, 22, 34, 58, 79, 43, 50 — відповідно, перший—сьомий лічильники імпульсів; 5, 23, 26, 29, 35, 44, 72, 81, 82, 51, 59, 85 — відповідно, перший — дванадцятий логічні елементи АБО; 6, 20, 37, 83, 64 — відповідно, перший—п'ятий розподільники тактів; 7, 21, 36, 60, 77, 78, 45, 52 — відповідно, перший—восьмий логічні елементи І; 8 — блок установки нуля; 9, 63 — відповідно, перший і другий дільники частоти; 10, 24, 38, 76, 84 — відповідно, перший—п'ятий генератори імпульсів; 11, 46, 53 — відповідно, перший—третій перетворювачі напруги; 12 — диференціальний підсилювач; 14 — регістр з інверсними виходами; 15 — задавач коду; 16, 18 — перший і другий суматори, відповідно; 17 — задавач швидкості зміни температури; 19, 62, 70, 71, 87 — відповідно, перший — п'ятий цифрові компаратори; 25 — задавач ресурсу двигуна; 27 — двійковий лічильник ресурсу; 28 — логічний елемент АБО-НІ; 30, 73 — відповідно, перший та другий підсилювачі сигналу; 31 — сенсор вібрації; 39, 65, 66 — відповідно, перший — третій сенсори температури; 54, 55, 74 — відповідно, другий, третій та перший компаратори; 61 — задавач максимального рівня вібрації; 75 — блок опорної напруги; 80 — дешифратор; 86 — задавач максимального рівня температури

У частині схеми пристрою, що містить блоки 1—10, 40—45, 47—52 здійснюється вимірювання значення струму електродвигуна та його перерахунок у виділене тепло з подальшим урахуванням в зміні залишкового ресурсу двигуна, а у частині схеми, що містить блоки 74—82 та 85, здійснюється узгодження роботи першого 10, другого 24, третього 38 та п'ятого 84 генераторів імпульсів.

Контроль теплового старіння ізоляції електродвигуна до моменту його охолодження реалізований на базі шостого логічного елемента І 78, восьмого логічного елемента АБО 81 та другого генератора імпульсів 24, а контроль вібрації електродвигуна до моменту його зупинки — на базі шостого логічного елемента І 78, дев'ятого логічного елемента АБО 82 та третім генератором імпульсів 38. Температура ж обмоток електродвигуна контролюється на базі шостого логічного елемента І 78, дванадцятого логічного елемента АБО 85 та п'ятого генератора імпульсів 84.

У випадку обнуління двійкового лічильника ресурсу 27, що свідчить про вичерпання ресурсу роботи двигуна, останній відключається від мережі сигналом, поданим з виходу логічного елемента АБО-НІ 28 через п'ятий логічний елемент АБО 29 і перший підсилювач сигналу 30, або ж видається попереджувальний сигнал експлуатаційному персоналу (в коло сигналізації).

В частині схеми пристрою, що містить блоки 11—24, 39, 54, 56—60, 83 та 84 здійснюється вимірювання значення температури і перетворення її у відповідне значення відпрацьованого ресурсу двигуном. У випадку перевищення швидкості зміни температури максимально допустимого значення, яке записане у цифровому коді в задавачі швидкості зміни температури 17, подається сигнал в коло сигналізації.

У випадку обнуління другого лічильника імпульсів 22, на виході другого логічного елемента І 21 присутній сигнал логічного нуля. В двійковому лічильнику ресурсу 27 від залишкового ресурсу двигуна віднімається відпрацьований ресурс, обумовлений старінням ізоляції обмотки перевищенням температури.

У випадку перевищення температури обмотки двигуна максимально допустимого значення, яке записане у цифровому коді в задавачі максимального рівня температури 86, подається сигнал в коло сигналізації.

У частині пристрою (рис. 2, блоки 31—38) здійснюється вимірювання рівня вібрації електродвигуна і його перерахунок у відповідне значення відпрацьованого ресурсу двигуном. У випадку, коли рівень вібрації, виміряний сенсором вібрації 31, перевищує максимально допустимий рівень вібрації, який записаний в задавачі максимального рівня вібрації 61, подається сигнал в коло сигналізації.

У частині пристрою (рис. 2, блоки 63—73) здійснюється контроль технічного стану підшипникових вузлів електродвигуна за температурою. У випадку перевищення поточного значення температури будь-якого з підшипникових вузлів за допустиме значення, подається сигнал в коло сигналізації.

Висновки

Розроблено математичну модель функціонування блока обчислення залишкового ресурсу асинхронного електричного двигуна з короткозамкненим ротором у вигляді системи секвенцій, яка, на відміну від існуючих, дозволяє враховувати струми у кожній фазі електродвигуна, температуру найнагрітішої точки обмотки, швидкість зміни температури обмотки, температуру підшипникових вузлів та рівень вібрації, на підставі якої синтезовано функціональну схему блока обчислення залишкового ресурсу асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Це дало можливість розробити структуру пристрою для визначення його залишкового ресурсу в процесі функціонування двигуна, яка забезпечує можливість підвищити надійність його роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] М. П. Розводюк, та Д. С. Хайнацький «Синтез структури пристрою для контролю технічного стану асинхронного двигуна», на *Всеукраїнська науково-практична Інтернет-конференція студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (МН-2019)*, Вінниця, ВНТУ, 2019 р. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2019/paper/view/6176>. Дата звернення: Лютий, 27, 2019.

[2] Б. І. Мокін, та М. П. Розводюк, *Математичні моделі та системи технічної діагностики основних електротехнічних систем міських трамваїв*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005, 126 с.

[3] Диагностика асинхронных электродвигателей. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://works.doklad.ru/view/9iw4cN2Swls.html>. Дата обращения: Февраль, 27, 2019.

[4] В. В. Грабко, Є. Я. Блінкін, та М. П. Розвodiюк, «Синтез структури ІВС для діагностування електродвигунів,» *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 4, с. 111-115, 2000.

[5] В. Н. Захаров, *Автоматы с распределенной памятью*. Москва, Россия: Энергия, 1975, 136 с.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 28.02.2019

Розвodiюк Михайло Петрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті, e-mail: rozvodiukmp@gmail.com ;

Бомбик Вадим Сергійович — канд. техн. наук, старший викладач кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті, e-mail: vadbvvv@gmail.com

M. P. Rozvodiuk¹
V. S. Bombyk¹

The Device Structure Synthesis for Determination of Residual Life of the Squirrel Cage Induction Motor

¹Vinnytsia National Technical University

Many of the electric motors, including squirrel cage induction motors, which operate on the factories, have already exhausted their resource which was guaranteed by the manufacturing plant. Many of them however are still able to perform the assigned tasks. Their use therefore is not stipulated for by the terms of service, but by their technical condition. Hence, their reliable operation significantly depends upon the precise information on the residual resource which is necessary to know. The same is applied to the new electric motors, in the course of operation of which there are many different overloads which may dramatically decrease the remaining resource.

The most reliable methods and means for diagnosing squirrel cage induction motors are those that are provided for continuous monitoring of the technical condition of electric motors during their operation. Therefore, it is chosen to determine the residual life of an electric motor during its operation.

As the diagnostic features for determining the residual life of a squirrel cage induction motor, there had been chosen the following parameters: currents in each phase of the electric motor, the temperature of the most heated point of the winding, the speed of change in the temperature of the winding, the temperature of the bearing units, the level of vibration.

To synthesize the structure of the device aimed at determining the residual life of the electric motor, there had been used the apparatuses of sequences. The paper shows the process of synthesis for two values of current, two values of winding temperatures, two values of speed of changes in winding temperatures, two values of bearings temperature and two vibration values.

There had been presented the mathematical model of functioning of the block of calculation of the residual resource of a squirrel cage induction motor in the form of a system of sequences.

On the basis of the received sequential model there had been synthesized a functional diagram of the block of calculation of the residual life of the squirrel cage induction motor which enabled to develop the structure of the device to determine its residual resource.

The received structure of the device allows to control the parameters of the electric motor during its operation.

Keywords: electric motor, squirrel cage induction motor, residual life, reliability of operation.

Rozvodiuk Mykhailo P. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Electromechanical Systems Automation in Industry and Transport, e-mail: rozvodiukmp@gmail.com ;

Bombyk Vadym S. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Electromechanical Systems Automation in Industry and Transport, e-mail: vadbvvv@gmail.com

Синтез структуры устройства для определения остаточного ресурса асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

¹Вінницький національний технічний університет

Значительная часть электрических двигателей, в том числе и асинхронных с короткозамкнутым ротором, работающих на производстве, уже исчерпали свой ресурс, предусмотренный заводом-изготовителем. Однако большинство из них еще способны выполнять возложенные на них задачи. Поэтому их использование реализовано не по сроку службы, а по техническому состоянию. Но для надежной работы таких электрических двигателей нужно точно знать их остаточный ресурс. Это касается и новых электрических двигателей, в процессе эксплуатации которых возможны различные перегрузки, способные резко уменьшить оставшийся ресурс.

Наиболее достоверными методами и средствами диагностирования асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором есть те, которые обеспечивают постоянный мониторинг технического состояния электродвигателей в процессе их эксплуатации. Поэтому принято решение определять остаточный ресурс электродвигателя в процессе его эксплуатации.

В качестве диагностических признаков для определения остаточного ресурса асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором выбраны следующие параметры: токи в каждой фазе электродвигателя, температуру наиболее нагретой точки обмотки, скорость изменения температуры обмотки, температуру подшипниковых узлов, уровень вибрации.

Для синтеза структуры устройства в определении остаточного ресурса электрического двигателя использован аппарат секвенций. В работе показан процесс синтеза для двух значений тока, двух значений температур обмотки, двух значений скорости изменений температур обмотки, двух значений температур подшипников и двух значений вибраций.

Представлена математическая модель функционирования блока вычисления остаточного ресурса асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в виде системы секвенций. На основе полученной секвенциальной модели синтезирована функциональная схема блока вычисления остаточного ресурса электрического двигателя, что позволило разработать структуру устройства для определения его остаточного ресурса. Полученная структура устройства позволяет контролировать параметры асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в процессе его работы.

Ключевые слова: электрический двигатель, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, остаточный ресурс, надежность работы.

Розводюк Михайл Петрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электромеханических систем автоматизации в промышленности и на транспорте, e-mail: rozvodiukmp@gmail.com ;

Бомбик Вадим Сергеевич — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры электромеханических систем автоматизации в промышленности и на транспорте, e-mail: vadbvvv@gmail.com